

2.Справочник по клеям и клеящим мастикам в строительстве / Под ред. В.Г.Микульского, О.Л.Фиговского. – М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.

3.Методические рекомендации по омоноличивают старого бетона новым с применением клеев / Харьковский ПромстройНИИпроект Госстроя СССР. – Харьков, 1985. – 14 с.

4.Шутенко Л.Н., Псурсцева Н.А., Душин В.В. и др. Опыт применения клеевых соединений в строительстве. – Харьков: НТО Стройиндустрии, 1989. – 98 с.

5.Шутенко Л.Н., Золотов М.С., Гарбуз А.О.Ресурсосберегающий модифицированный акриловый клей с повышенной адгезионной прочностью и термостойкостью // Збірник наукових праць РДТУ. Вип. 3. – Рівне: РДТУ, 1999. – С. 57-63.

6.Черкасский И.Г., Серкова З.В., Ляхович И.А. Омоноличивание рабочих стыков конструкций цементно-жидкостекольным клеем // Бетон и железобетон. – 1985. – № 5. – С. 38-39.

Получено 21.05.2002

## КОММУНАЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 532.517.4

О.Г.ИСАКИЕВА

*Харьковский государственный технический университет  
строительства и архитектуры*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В БИОКАНАЛАХ, ЗАРОСШИХ НЕВЫСОКОЙ ГИБКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ**

Приводятся теоретические и экспериментальные данные для потоков с гибкой растительностью. Приведены математические модели (Герберта, Фелпса-Стритера) процессов переноса загрязняющих веществ в турбулентном потоке. Разработана эмпирическая модель для решения практических задач гидравлики каналов. Рассматривается математическое моделирование процессов переноса загрязняющих веществ в биоканалах и биоплато с невысокой гибкой растительностью, в которых происходят гидродинамические и биохимические процессы. Под действием последних происходит окисление загрязняющих веществ и снижение их концентрации в каналах, транспортирующих воду на большие расстояния. Сопоставляются результаты численной реализации разных модификаций математических моделей процессов переноса в различного типа реакторах.

Воздействие гидротехнического строительства на водные объекты характеризуется многообразием и сложностью в силу взаимодействия множества факторов и трудности прогнозирования возможных последствий. Особенно важен прогноз водного режима, распределение во времени и пространстве скорости течения, температуры воды, концентрации растворенного кислорода, биогенных элементов, скорости продукционных процессов и, в конечном итоге, общего состояния

водных экосистем [1]. Математическое моделирование процессов переноса в водных экосистемах можно осуществить на основе решения системы уравнений, описывающих гидродинамические и биохимические процессы переноса.

В последние годы разрабатываются количественные оценки эффективности биологической очистки в аппаратах и сооружениях. Во многих работах [1-3] нашли отражение различные модели, описывающие кинетику биохимических процессов, явления метаболизма при окислении субстрата и росте микроорганизмов [2,3]. Наибольший интерес представляет изучение механизма биопревращений с учетом последовательности стадий адсорбции и метаболизма [2,3]. Между активным илом и средой происходит интенсивный обмен веществ.

Одним из основных вопросов рационального проектирования реактора для смешения продуктов превращений является выбор типа реактора (смесителя или вытеснителя). В общем случае процесс переноса веществ можно записать в виде

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial C_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} D \frac{\partial C_i}{\partial x_j} + \Phi_i, \quad (1)$$

где  $i=1,2,3$ ;  $j=1$  (в одномерной постановке суммирование не производится);  $C_i$  — концентрация  $i$  субстанции соответственно  $i$ -органических загрязнений ( $i=1$ ), активного ила ( $i=2$ ) и растворенного кислорода ( $i=3$ );  $t$  — время;  $D$  — коэффициент продольной дисперсии;  $\Phi_i$  — функция источника (стока) субстанции  $i$ ;  $U_j$  — осредненная скорость движения в  $j=1$  продольном направлении переноса рассматриваемой субстанции.

Функции  $\Phi_i$ , описывающие кинетику биохимических превращений, имеют ряд модификаций [1,2,3]:

$$\bar{\Phi}_1 = \frac{\partial C_1}{\partial t} = -\frac{\mu_{\max}}{Y} \frac{C_1 C_2}{K_T + C_1} \beta K_d C_2; \quad (2)$$

$$\bar{\Phi}_2 = \frac{\partial C_2}{\partial t} = \mu_{\max} \frac{C_1 C_2}{K_T + C_1} - K_d C_2; \quad (3)$$

$$\bar{\Phi}_3 = \frac{\partial C_3}{\partial t} = K_{La} (C_3^H - C_3) - c \frac{dC_1}{dt}, \quad (4)$$

где  $\mu_{\max}$  — максимально возможная скорость роста микроорганизмов;  $K_T$  — концентрация насыщения, численно равная концентрации орга-

нических загрязнений, которые обеспечивают скорость роста микроорганизмов, равную половине максимальной;  $K_d$  – скорость отмирания микроорганизмов;  $Y$  – экономический коэффициент;  $\beta$  – феноменологический коэффициент;  $C_3$  – концентрация растворенного кислорода;  $C_3^H$  – концентрация насыщения кислорода;  $K_{La}$  – объемный коэффициент массопереноса кислорода ( $K_{La}$  в аэротенке рассчитываем по подаче воздуха, для канала же не учитываем искусственную подачу воздуха и рассматриваем процесс окисления, при котором подача воздуха не лимитируется);  $s$  – коэффициент, выражающий требуемое количество кислорода для ассимиляции единицы субстрата (по БПК).

Модель, состоящая из уравнений (1)–(4), является существенным упрощением сложных процессов, которые происходят при взаимодействии загрязнений воды субстратом и активного ила, который образуется в водной среде при определенных условиях.

Из анализа уравнений (2)–(4), описывающих изъятие загрязнений из водной среды, можно заключить, что модификации Герберта [2] адекватно описывают процессы изъятия загрязнений за счет сорбционных и биохимических процессов и могут быть использованы при формулировании гидродинамической модели с учетом биосорбции и окисления. При этом видно, что коэффициенты модели Герберта могут быть оценены непосредственно из результатов экспериментальных исследований. Систему уравнений (2)–(4) приведем к безразмерному виду в одномерной постановке задачи:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{C_{i0}}{T} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial \bar{t}}; \quad (5)$$

$$\bar{U}_{cp} \frac{\partial C_i}{\partial x_1} = \frac{U_o C_{i0}}{L} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial \bar{x}_1}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{C_{i0}}{T} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial \bar{x}_1}; \quad (7)$$

$$U_{cp} \frac{\partial C_i}{\partial x_1} = \frac{U_o C_{i0}}{L} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial \bar{x}_1}; \quad (8)$$

$$\frac{d}{dx_1} \left( D \frac{dC_i}{dx_1} \right) = \frac{d}{L d\bar{x}_1} \frac{D \cdot C_{i0}}{L} \frac{d\bar{C}_i}{d\bar{x}_1}; \quad (9)$$

$$\Phi_i = C_{i0} \frac{T}{t} \bar{C}_i, \quad (10)$$

где  $L$  – линейный размер;  $T$  – время прохождения  $L$ ,  $T = L/U$ .

Разделим все члены уравнений (7)–(10) на величину  $(U_0 C_{i0})/L$  и получим

$$\frac{C_{i0}}{T} \frac{L}{U_0 C_{i0}} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial x_1} = \frac{d}{L dx_1} \frac{D \cdot C_{i0}}{L} \frac{d \bar{C}_i}{dx_1} \frac{LD \cdot C_{i0}}{U_0 C_{i0}} + \frac{K_T \cdot C_{i0} \cdot L}{U_0 C_{i0}} \quad (11)$$

или

$$\frac{1}{Sh} \frac{d \bar{C}_i}{dt} + \frac{d \bar{C}_i}{dx_1} + \frac{d}{dx_1} \left( \frac{1}{Pe} \frac{d \bar{C}_i}{dx_1} \right) + \frac{K_T L}{U} \Phi_i T = 0, \quad (12)$$

где  $Sh$  – число Струхала,  $Sh = \frac{UT}{L}$ ;  $Pe$  – число Пекле,  $Pe = \frac{U_{cp} L}{D}$ ;

$\Phi_i$  – функция источника (стока);  $T$  – время пребывания в реакторе;  $L$  – длина активной части реактора (длина водотока).

Для скорости растворения и поглощения кислорода используется уравнение [2]:

$$\Phi_3 = K_{La} (C_3^H - C_3) - c \frac{dC_1}{dt}. \quad (13)$$

Здесь рассматривается изъятие загрязнений как процесс биохимического окисления [1,2]. Из работы [2] следует, что окислению предшествует сорбция загрязнений поверхностью растительности. Процесс сорбции является определяющим в начальный момент контакта. В связи с тем, что начальный момент сорбции охватывает малый промежуток времени, то его можно использовать в качестве граничного (начального) условия. Величина адсорбции оценивается  $K_C C_{i0}$ .

На входе в реактор граничные условия выразим так:

$$D \frac{dC_1(0)}{dx_1} = U_{cp} [C_1(0) - C_{i0}(1 - K_C)]; \quad (14)$$

$$D \frac{dC_2(0)}{dx_1} = U_{cp} (C_2(0) - C_{20}), \quad (15)$$

где  $U_{cp}$  – средняя расходная скорость.

Граничное условие для выхода из реактора ( $x_1=L$ ) задаем, исходя из условия стабилизации процесса биоокисления и сорбции:

$$\frac{dC_i(L)}{dx_i} = 0. \quad (16)$$

Для стационарной задачи и условий, когда кислород не лимитирует процесс окисления, математическая модель может быть представлена в виде

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left( \frac{1}{P} \frac{d\bar{C}_1}{d\bar{x}_1} \right) - \frac{d\bar{C}_1}{d\bar{x}_1} - T\Phi_1 = 0 ; \quad (17)$$

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left( \frac{1}{P} \frac{d\bar{C}_2}{d\bar{x}_1} \right) - \frac{d\bar{C}_2}{d\bar{x}_1} - T\Phi_2 = 0 ; \quad (18)$$

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left( \frac{1}{P} \frac{d\bar{C}_3}{d\bar{x}_1} \right) - \frac{d\bar{C}_3}{d\bar{x}_1} - c \frac{dC_1(\bar{x}_1)}{d\bar{x}_1} = 0 , \quad (19)$$

при  $\bar{x}_1 = 0$

$$\frac{1}{Pe} \frac{d\bar{C}_1(0)}{d\bar{x}_1} = \bar{C}_1(0) - (1 - K_C) ; \quad (20)$$

$$\frac{1}{Pe} \frac{d\bar{C}_2(0)}{d\bar{x}_1} = \bar{C}_2(0) - \bar{C}_{20} ; \quad (21)$$

$$C_3(0) = 0 \quad (22)$$

при  $\bar{x}_1 = 1$

$$\frac{1}{Pe} \frac{dC_i(1)}{d\bar{x}_1} = 0 \quad (i = 1, 2, 3), \quad (23)$$

где  $K_C$  – коэффициент сорбции;

Применение каналов с растительностью вызывает необходимость решения вопроса об улучшении качества воды в связи с изъятием загрязняющих веществ в результате процессов адсорбции, окисления. При этом, используя методы прогноза гидродинамических характеристик каналов и процессов переноса загрязняющих веществ (БПК) и растворенного кислорода (РК), следует не усложнять задачу математического моделирования процессов и не рассматривать все составляющие баланса, поскольку незначительное улучшение точности математической модели приводит к ряду трудностей.

Известные модели (Герберта и др.) позволяют получить решение с учетом гидродинамических факторов. Эти модели следует отнести к инженерно-экологической группе [1]. В ряде случаев удобно использовать инженерную модель для описания БПК и РК. Примером инженерной модели для расчета концентрации БПК и РК является распро-

страненное (классическое) описание мономолекулярной реакции в виде, предложенном Е.Б.Фелпсом и Х.В.Стритером:

$$\frac{dC_{\text{БПК}}}{dt} = -k_1 C_{\text{БПК}}; \quad (24)$$

$$\frac{dO}{dt} = k_1 C_{\text{БПК}} - k_2 O, \quad (25)$$

где  $C_{\text{БПК}}$  – концентрация легкоокисляемых органических загрязнений;  $C_{\text{РК}}$  – концентрация растворенного кислорода;  $C_{\text{РК}}^{\text{H}}$  – концентрация насыщения растворенного кислорода;  $O$  – концентрация растворенного кислорода,

$$O = C_{\text{РК}}^{\text{H}} - C_{\text{РК}}. \quad (26)$$

Приведенные уравнения имеют следующее решение:

$$C_{\text{БПК}} = C_{0\text{БПК}} e^{-k_1 t}; \quad (27)$$

$$O = \frac{k_1 C_{0\text{БПК}}}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + O_0 e^{-k_2 t}, \quad (28)$$

где  $C_{0\text{БПК}}$  – концентрация БПК в начальный момент времени;  $O_0$  – концентрация растворенного кислорода;  $k_1$  и  $k_2$  – эмпирические коэффициенты, обусловленные неконсервативностью жидкости [4], которые находятся в широком диапазоне значений и зависят от множества факторов: от геометрических параметров канала, числа Пекле  $Pe$ , коэффициента массообмена  $K_{La}$ , густоты водной растительности и, следовательно, от адсорбционных процессов и параметров, характеризующих их для реакции 1-го порядка:

$$k_1 = \frac{1}{T} \lg \frac{C_{0\text{БПК}}}{C_{\text{кБПК}}}, \quad (29)$$

где  $T$  – период процесса,  $C_{\text{кБПК}}$  – конечное значение БПК.

На рис.1 приведено сопоставление рассчитанных и измеренных распределений концентраций загрязняющих веществ по БПК по длине реактора-вытеснителя с вынужденной подачей воздуха.

На рис.2 приведены результаты сопоставления изменения концентрации загрязняющих веществ по длине гидроканала с учетом и без учета процесса сорбции. В начальный момент процесс сорбции оказывает существенное влияние на изъятие загрязняющих веществ. В даль-

нейшем процесс сорбции не оказывает такого влияния, как в начальный момент.

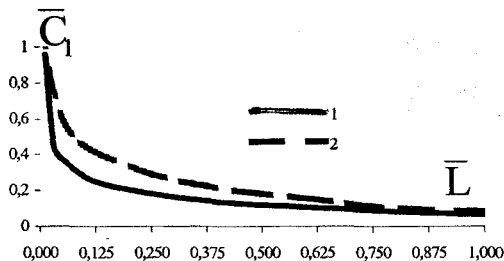


Рис.1 — Распределение концентраций ингредиентов (БПК) по длине аэрационного сооружения: 1 — с учетом адсорбции; 2 — без учета адсорбции.  
Экспериментальные данные при  $T = 6$  ч,  $C_0 = 120$  мг/г

Процессы изъятия загрязняющих веществ в аэротенке (рис.1) и в канале (рис.2) качественно сходные, отличие заключается в том, что процессы массообмена в аэротенке диктуются аэрационными процессами, а в гидроканалах процессы переноса обусловлены множеством факторов, в том числе турбулентностью, вызванной гидродинамикой канала, и ветровыми переносами.

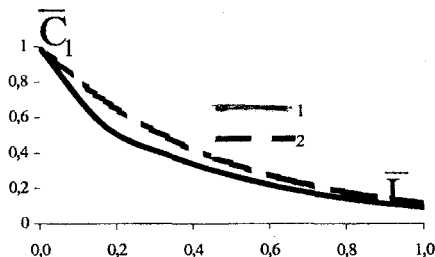


Рис.2 - Распределение концентраций ингредиентов (БПК) по длине канала  
(1 — с учетом влияния сорбции; 2 — без учета влияния сорбции)

Для каналов с растительностью выполнен анализ применимости как модели Герберта, так и однопараметрической модели Фелпса-Стритера. Исходя из анализа опытных данных (рис.1), предполагается, что процесс сорбции оказывает большое влияние в начальной стадии процесса. Число Пекле  $Pe$ , коэффициент массообмена  $K_{La}$  существенны в течение длительного промежутка времени и их воздействие появляется при обтекании растительности и препятствий другого происхождения (неровности дна в виде каменной наброски).

Модели Фелпса-Стритера, Герберта дают качественное совпадение с результатами экспериментальных исследований различных авторов в биоканалах и аэрационных сооружениях. Для практических целей целесообразно использовать инженерно-экологическую модель Фелпса-Стритера.

Здесь не рассматривается применение более сложных гидродинамических моделей с учетом модели замыкания, которые приведены в [5].

1. Романенко В.Д., Оксиков О.П., Жукинский В.А., Стольберг Ф.В., Лаврик В.И. Экологическая оценка воздействия гидродинамического строительства на водные объекты. - Институт гидробиологии. АН УССР. - К.: Наукова думка, 1990 - 236 с.

2. Истомина Л.П., Нетохайло А.П., Ушакова Л.Н., Шеренков И.А. К вопросу о моделировании очистки сточных вод в аэротенке // Водные ресурсы. - 1979. - №4. - С. 196-202.

3. Истомина Л.П., Литвин О.Н., Нетохайло А.П., Ушакова Л.Н., Шеренков И.А. Расчет распределения концентрации растворенного кислорода по длине аэротенка // Водоснабжение, канализация, гидротехнические сооружения. Вып.19. - К.: Будівельник, 1976.

4. Нетохайло А.П., Смирнова Г.Н., Ярошенко Л.Н. Прогноз качества воды в водотоках, водоемах и морях как приемниках сточных вод на основе методов математического моделирования: Уч. пособие. - К.: ИСИО, 1993. - 188 с.

5. Нетохайло А.П., Исакиева О.Г. Плавающие струи и "плумы" в неоднородном по скорости и плотности несущем потоке несжимаемой жидкости // Науковий вісник будівництва. Вип.6. - Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 1999. - С.131-133.

*Получено 29.05.2002*

УДК 628.16

**В.В.ПАБОЛКОВ**

ТПО "Харьковкоммунпромвод"

### **ОЧИСТКА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ОТ БАКТЕРИАЛЬНОГО И ВИРУСНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Приводятся результаты лабораторных исследований с использованием современного высокотехнологического УФ-оборудования НПО «ЛИТ» для дезинфекции питьевой воды на сооружениях водоподготовки ТПО "Харьковкоммунпромвод".

Полная дезинфекция питьевой воды и 100%-ное удаление из нее микробного загрязнения гарантируют предотвращение массовых заболеваний населения острыми кишечными инфекциями – дизентерией, энтероколитами, брюшным тифом, паратифами, вирусными гепатитами А и Е и другими энтеровирусными инфекциями [1]. Но решение этой проблемы в последнее время сильно усложняется практически повсеместным резким ухудшением качества воды поверхностных водоисточников по микробиологическим показателям. Все чаще обнару-